含不同尺寸双腐蚀缺陷 L245NCS 钢管剩余强度计算

孙溢彬[1],贾文龙[1],张洋铭[2],方天海[3],李长俊[1],党文俊[4]

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院,610500 成都;
2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司井下作业公司,610000 成都;
3. 中国石油集团西南油气田分公司蜀南气矿,646000 泸州;4. 西气东输甘陕管理处靖边压气站,718500 榆林)

摘　要:基于非线性有限元方法,建立含腐蚀缺陷管道的剩余强度计算模型,采用实验数据验证模型的准确性。在此基础上,以 L245NCS 管道为对象,研究了管道内腐蚀缺陷间轴向和环向的距离对剩余强度的影响。通过多因素影响分析,修正了 ASME B31G 标准中含双点腐蚀缺陷管道剩余强度的公式。结果表明:缺陷间在一定距离内会存在相互作用且发生相互作用的极限距离随缺陷深度的增加而增加;采用 DNV-RP-F101 标准计算的双缺陷相互影响的极限轴向间距和极限环向角度偏大,标准计算值与有限元计算值的最大相对误差达 41%;修正后的剩余强度计算公式可用于计算含不同尺寸双腐蚀缺陷的中低强度管道的剩余强度,且计算结果相比于 ASME B31G 公式更接近实验值,平均相对误差为 1.80%,较 ASME B31G 下降了 9.86%。

关键词:双腐蚀缺陷;剩余强度;极限间距;计算公式;有限元

中图分类号:TE8　　　　**文献标志码**:A

Calculation of residual strength of L245NCS steel pipe with double corrosion defects of different size

SUN Yibin[1], JIA Wenlong[1], ZHANG Yangming[2], FANG Tianhai[3], LI Changjun[1], DANG Wenjun[4]

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, 610500 Chengdu, China;
2. Downhole Operation Company of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., LTD, 610000 Chengdu, China;
3. Southwest Oil and Gas Field Branch of China Petroleum Group Shunan Gas Mine, 646000 Luzhou, China;
4. Jingbian Compressor Station, Ganshan Shaanxi Management Office of West-East Natural Gas Transmission, 718500 Yulin, China)

Abstract: Based on the nonlinear finite element method, the residual strength calculation model of the pipeline with corrosion defects is established, and the accuracy of the model is verified by experimental data. On this basis, with L245NCS pipeline as the object, the influence of the axial and circumferential distance between corrosion defects in the pipeline on the residual strengthis studied. Through multi-factor influence analysis, the formula for residual strength of pipelines with double-point corrosion defects in the

收稿日期:2021-08-07　　　　**修回日期**:2021-12-20
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 51604233)
通信作者:贾文龙。E-mail:jiawenlong08@126.com
引用格式:孙溢彬,贾文龙,张洋铭,等. 不同尺寸双腐蚀缺陷 L245NCS 钢管剩余强度计算[J]. 应用力学学报,2022,39(2):367-374.
SUN Yibin, JIA Wenlong, ZHANG Yangming, et al. Calculation of residual strength of L245NCS steel pipe with double corrosion defects of different size[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):367-374.

ASME B31G standard is revised. The results show that: There is an interaction between defects within a certain distance and the limit distance for interaction increases with the increase of defect depth. The limit axial distance and the limit hoop angle of the mutual influence of double defects calculated by the DNV-RP-F101 standard are too large, and the maximum relative error between the standard calculation value and the finite element calculation value is 41%. The modified residual strength calculation formula can be used to calculate the residual strength of medium and low strength pipelines with double corrosion defects of different size, and the calculated result is closer to the experimental value than ASME B31G formula, with an average relative error of 1.80%, which is 9.86% lower than that of ASME B31G.

Key words: double corrosion defect; residual strength; limit distance; calculation formula; FEM

油气管道受到输送介质、服役时间等因素的影响会不可避免的产生内腐蚀缺陷,通常情况下管道内会存在多个缺陷。缺陷能使管壁变薄,降低管道的强度,严重时还会导致管道发生破裂[1]。当管道上存在多个缺陷时,缺陷间在一定距离内会发生相互作用,情况更加复杂。为了计算缺陷间发生相互作用时管道的剩余强度,需要知道它们发生相互作用时的极限距离,进而推导出能够计算含多腐蚀缺陷管道剩余强度的计算公式。

美国石油学会发布的 API 5L[2] 标准将油气钢管划分为 3 种钢级,分别为低强度钢级、中强度钢级和高强度高级。其中,低强度钢级包括 A25、A、B;中强度钢级包括 X42、X46、X52;高强度钢级包括 X56 及 X56 以上的钢级。国内外关于评价腐蚀管道剩余强度的标准主要有适用于评价中低强度管道的 ASME B31G[3] 和 SY/T 6151-2009[4]、适用于评价中高强度管道的 DNV-RP-F101[5]、适用于评价高强度管道的 API 579[6] 等标准。然而这些标准研究的对象大多数为单腐蚀,仅有 DNV-RP-F101 标准给出了计算多个腐蚀发生相互作用时轴向和环向极限距离的计算公式。

文献[7]研究了腐蚀的深度、长度和宽度与缺陷间距的关系,并提出了缺陷间发生相互作用的准则。文献[8]提出了缺陷间相互作用准则,得到不同缺陷间相互影响的轴向极限距离为 25.4 mm。文献[9]基于有限元分析预测了内压作用下,含周向凹槽腐蚀管道的失效压力和破坏趋势,并拟合了失效压力计算公式。文献[10]使用有限元与曲线拟合的方法,对 RSTRENG 标准中的腐蚀管道剩余强度计算公式进行了改进。结果显示,使用改进后的公式计算出的结果相比于原公式更接近实际值。文献[11]使用有限元方法研究了相互作用的缺陷对 X46 钢管剩余强度的影响。结果表明,腐蚀间的相互作用会降低管道的剩余强度,并且随着缺陷深度的增加会大大降低管道的剩余强度。文献[12]基于有限元模拟的结果研究了含单腐蚀的 X80 管道的失效机理,并拟合出了计算管道失效压力的预测公式。文献[13]使用有限元分析得到了计算缺陷间轴向和环向极限距离的公式。文献[14]采用有限元方法,基于标准给出的单点腐蚀管道剩余强度计算公式,推导出了含轴向分布的双腐蚀管道的剩余强度计算公式。文献[15]分析了轴向双腐蚀间相互作用的规律,基于有限元计算的结果,提出了双腐蚀缺陷相互作用系数,并拟合出了计算双腐蚀缺陷相互作用系数的公式。

现有标准给出的剩余强度计算公式往往适用于单点腐蚀管道,虽然某些标准给出了缺陷间发生相互作用时极限距离的计算公式,但未推荐双点腐蚀管道剩余强度的计算公式。近些年,文献[16]使用拟合的方法研究双点腐蚀管道的剩余强度,但研究的对象大多是两个相同尺寸的缺陷,对两个不同尺寸缺陷的研究还较少,而且大部分公式只考虑了缺陷的轴向距离,没有考虑环向距离。

本研究使用 Workbench 建立了含缺陷的 L245NCS 钢管道模型。通过有限元方法研究了轴向和环向间距对含两个不同尺寸缺陷管道剩余强度的影响,将得到的极限间距结果与使用 DNV-RP-F101 标准计算出的结果进行比较。基于有限元结果,对 ASME B31G 标准中的剩余强度计算公式进行修正,修正后的公式考虑了缺陷间的轴向间距和环向间距的影响,可用于计算含不同尺寸双腐蚀缺陷的中低强度管道的剩余强度。

1 有限元分析可靠性验证

1.1 失效准则

目前,用于判别腐蚀管道是否发生失效的准则主要有两种:一种是弹性失效准则,该准则认为腐蚀区域内的 Von Mises 等效应力等于管材的屈服强度时,管道发生破坏;另一种是塑性失效准则,该准则认为腐蚀区域内的 Von Mises 等效应力等于管材的极限抗拉强度时,管道发生破坏。相比于弹性失效准则,塑性失效准则考虑的因素更全面,计算结果更加接近实验值,故本研究选用塑性失效准则作为判别依据。Von Mises 等效应力的表达式如下。

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]} \quad (1)$$

其中:σ_s 为 Von Mises 等效应力;σ_1、σ_2、σ_3 分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴方向上的主应力。

1.2 模型及边界条件的设置

使用 Workbench 绘制了含缺陷管道的模型。网格数量过少会影响计算结果的准确性,网格数量过多会增加计算时间。为了提高计算效率,在保证网格精度的情况下,以缺陷的轴向为对称,绘制了 1/2 管道模型。为了避免分析时产生应力集中现象,对模型进行了圆角处理。由于缺陷的形状一般不规则,所以选择四面体网格对模型进行划分,为了分析缺陷处的应力情况,对缺陷处及周围区域进行网格加密处理,网格划分情况如图 1 所示。

由于模型是对称的,所以在管道的轴线剖面和缺陷的横截面上施加对称约束[17](Frictionless Support),在管道的两端面施加轴向位移约束,在管道的内壁施加压力 p。当腐蚀区域内的最大等效应力等于管材的极限抗拉强度时,此时的压力 p 就是管道的失效压力,也就是管道的剩余强度。

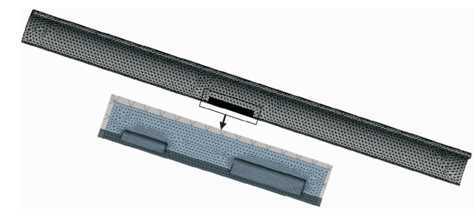


图 1 管道模型网格划分情况

Fig. 1 The meshing of the pipeline model

1.3 有限元分析实验验证

采用非线性有限元方法,对文献[18-20]中给出的 17 组含腐蚀缺陷的低强度管道和中强度管道的全尺寸爆破实验进行了有限元分析,包括 12 组单腐蚀和 5 组双腐蚀。得到的等效应力云图如图 2 和图 3 所示。

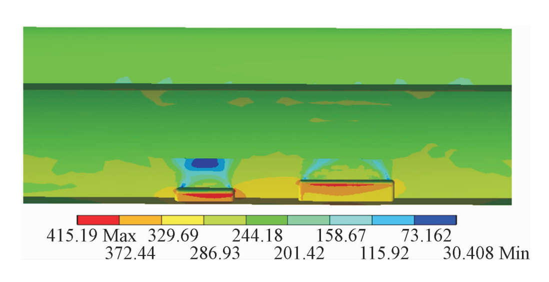


图 2 缺陷间距较小时的等效应力云图

Fig. 2 Equivalent stress nephogram when defects are relatively close

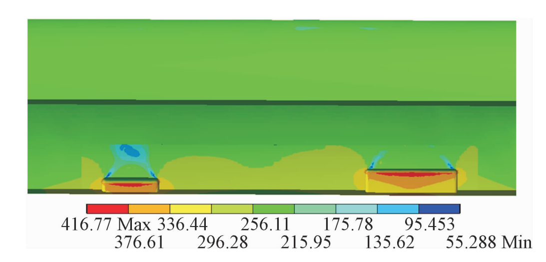


图 3 缺陷间距较大时的等效应力云图

Fig. 3 Equivalent stress nephogram when defects are relatively far

从图 2 和图 3 可以看到,当缺陷间距较小时,缺陷间的等效应力较大,说明此时缺陷间存在相互作用;当缺陷间距较大时,缺陷间的等效应力较小,说明此时缺陷间已不存在相互作用,管道的剩余强度只受其中一处缺陷的影响。当管道内的压力较小时,管道首先进入弹性阶段,缺陷处的等效应力逐渐增大。随着压力的增加,管道达到屈服阶段,此时缺陷处的等效应力增加的很少。当压力继续增加,管道进入强化阶段,且缺陷内边缘位置的等效应力开始增大,当最大等效应力等于材料的极限抗拉强度时,管道在此处发生破裂。这与实验中管道发生破裂的位置完全吻合,此时管道所受的内压即为腐蚀管道的失效压力。

将有限元结果与文献[18-20]中的实验结果进行了对比。从表 1 可以看出,最小相对误差为 0.51%、最大相对误差为 8.08%、平均相对误差为 3.01%。误差较小,验证了模型的可靠性,说明使用非线性有限元方法研究腐蚀管道的剩余强度是可行

的。

表 1 管道爆破实验结果与模拟结果对比

Tab. 1 Comparison of tests results and simulation results

编号	文献数据		计算数据	
	腐蚀相对深度	实验爆破压力/MPa	模拟爆破压力/MPa	相对误差/%
1.1	0.686	5.45	5.55	1.83
1.2	0.389	15.34	14.27	6.89
1.3	0.463	13.04	13.82	5.89
1.4	0.525	12.06	12.44	3.15
1.5	0.700	9.40	9.19	2.23
1.6	0.333	32.65	32.45	0.61
1.7	0.500	29.49	29.16	1.12
1.8	0.698	11.30	11.05	2.21
1.9	0.500	32.87	32.22	1.98
1.10	0.500	27.27	26.67	1.87
1.11	0.699	14.60	13.42	8.08
1.12	0.500	19.80	19.51	1.46
2.1	0.500	29.27	29.12	0.51
2.2	0.500	30.07	28.70	4.56
2.3	0.500	30.47	29.48	3.25
2.4	0.500	29.81	29.08	2.45
2.5	0.500	31.56	30.64	2.92

2 管道基础数据

本研究建立的腐蚀管道仿真模型的长度 $L=1\,300$ mm，外径 $D=108$ mm，壁厚 $t=6$ mm。管道的材料为 L245NCS 钢。这种材料具有良好组织和力学性能，且能满足在酸性服役条件下输送油气的要求，被广泛用于制作输送石油天然气钢管。L245NCS 钢的力学性能如表 2 所示。

表 2 L245NCS 钢的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of L245NCS steel

屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
245	415	2.06×10^5	0.3

调研了 L245NCS 管道内腐蚀缺陷的典型特征，发现大多数缺陷的尺寸都接近于表 3 中这 3 种缺陷的尺寸，说明他们能够更好地反映出 L245NCS 管道内壁腐蚀缺陷的特征，具有代表性。故选取了这 3 种不同尺寸的缺陷作为特征缺陷。

表 3 特征缺陷的尺寸及管道的失效压力

Tab. 3 The size of the characteristic defects and the failure pressure of the pipeline

缺陷编号	缺陷形状			失效压力/MPa
	长度/mm	宽度/mm	深度/mm	
1	44.6	19.3	2.67	31.74
2	17.1	14.9	1.90	36.60
3	27.8	10.7	3.44	31.96

通过有限元方法计算出了以上 3 种缺陷单独存在于管道内壁时，管道的失效压力见表 3。所得的单点腐蚀管道失效压力可以为研究双点腐蚀管道失效压力提供依据。

3 有限元结果分析

3.1 轴向不对称双点腐蚀管道有限元结果分析

为了探究两个不同尺寸缺陷间的轴向距离对管道剩余强度的影响，将表 3 中的缺陷两两组合，模拟缺陷间的轴向距离初始为 10 mm，逐次增加 10 mm，一直增加到 200 mm。用有限元方法模拟了 45 组方案，将得到的结果绘制成折线图并在图中标记出了部分点的数据，如图 4 所示。

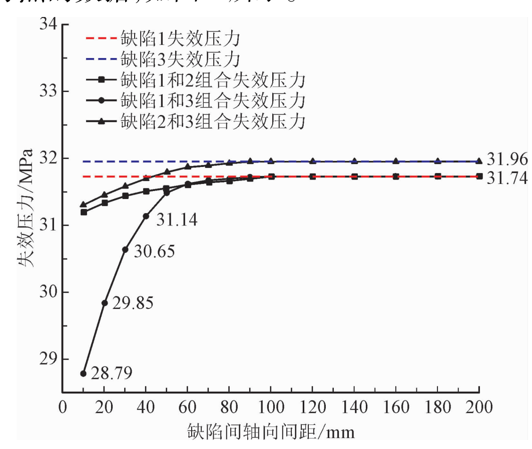


图 4 管道失效压力随缺陷间轴向距离的变化情况

Fig. 4 Variation of failure pressure with axial distance between defects

在图 4 可以看到，3 条曲线的变化趋势一致，均为先上升后平缓。缺陷间轴向距离越小，管道的失效压力越小，说明此时两缺陷存在相互作用。随着缺陷间轴向距离的增加，管道的失效压力也逐渐增大。可以发现，轴向距离在 50 mm 内，缺陷 1 和缺陷

3 组合后管道的失效压力相比于其他两种组合上升的幅度最大。这是因为管道的剩余强度受缺陷深度的影响较大，缺陷越深，管道的剩余强度越小[21]。这两种缺陷组合后，其深度大于其余两种缺陷的组合，这也就导致了当缺陷距离很近时，管道的剩余强度要远小于其他两种情况，所以其曲线上升的幅度是最大的。当轴向距离增大到一定值时，管道的失效压力不再增加，最终等于最严重的单点腐蚀管道的失效压力，也就是两个缺陷单独存在于管道时，管道失效压力的较小值。

缺陷间不发生相互作用的条件为

$$\frac{p_f}{p_0} \geqslant 0.99 \tag{2}$$

其中：p_f 为双点腐蚀管道的失效压力；p_0 为最严重单点腐蚀管道的失效压力。

根据此判别标准，对 45 组有限元结果进行了计算，得到的结果如下：缺陷 1 和缺陷 2 发生相互作用时的极限轴向距离为 30 mm；缺陷 2 和缺陷 3 发生相互作用时的极限轴向距离为 40 mm；缺陷 1 和缺陷 3 发生相互作用时的极限轴向距离为 50 mm。

对得到的计算结果进行分析后发现，相同缺陷与不同缺陷进行轴向组合时，所得到的极限轴向距离是不一样的。这说明单个缺陷的尺寸会对两个缺陷发生相互作用时的轴向距离产生影响。又由于主要影响腐蚀管道剩余强度大小的因素是缺陷的深度，所以随着两个缺陷深度的增加，缺陷间发生相互作用时的极限轴向距离也随之增加。

DNV-RP-F101[5] 标准中给出了腐蚀缺陷间发生相互作用时极限轴向距离计算公式，即

$$S = 2\sqrt{Dt} \tag{3}$$

其中：S 为极限轴向距离；D 为管道外径；t 为管道壁厚。

从上式可以看出，极限轴向距离只与管道的外径和壁厚有关，与缺陷的尺寸并没有关系。这也就说明，使用此公式计算出来的缺陷间发生相互作用时的极限轴向距离必然偏大且具有唯一性。有限元计算结果也恰好证明了这个结论，由式（3）计算出的极限轴向距离为 50.9 mm，使用有限元方法计算得到的极限轴向距离分别为 30 mm、40 mm 和 50 mm，计算得到的最大相对误差高达 41%。

3.2 环向不对称双点腐蚀管道有限元结果分析

将表 3 中的缺陷两两组合，模拟缺陷间的环向角度初始为 10°，逐次增加 10°，一直增加到 150°，研究环向角度的变化对管道剩余强度的影响。用有限元方法模拟了 39 组方案，将得到的结果绘制成折线图并在图中标记出了部分点的数据，如图 5 所示。

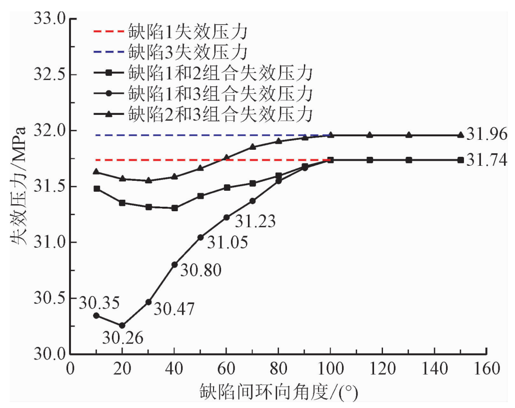


图 5　管道失效压力随缺陷间环向角度的变化情况

Fig. 5　Variation of failure pressure with hoop angle between defects

从图 5 可以看到，三条曲线的变化趋势一致。管道的失效压力随着环向角度的增加呈现出先减小后增加最后趋于平稳的趋势。可以发现，当环向角度为 10°时，管道的失效压力并不是最小的。这是因为两缺陷距离很近，缺陷经过组合后等效成了一个缺陷，说明在环向角度小于 10°时，仅存在等效缺陷管道的失效压力会大于含两个缺陷时管道的失效压力。而且当环向角度在 80°内，缺陷 1 和缺陷 3 组合后管道的失效压力相比于其他两种组合上升的幅度最大。出现这种现象的原因同样是因为这两种缺陷组合后的缺陷深度大于其余两种缺陷的组合，导致在环向角度很小时，管道的剩余强度远低于其余两种情况，也就导致了其曲线上升的幅度较为明显。当环向角度增加到一定值时，管道的失效压力将不再增加，最终等于最严重的单点腐蚀管道的失效压力，也就是两个缺陷单独存在于管道时，管道失效压力的较小值。

以相同的判别标准，对 39 组有限元结果进行了计算并分析，得到的结果如下：缺陷 1 和缺陷 2 发生相互作用时的极限环向角度为 50°，管道达到最小剩余强度时对应的环向角度为 40°；缺陷 2 和缺陷 3 发生相互作用时的极限环向角度为 60°，管道达到最小剩余强度时对应的环向角度为 30°；缺陷 1 和缺陷 3 发生相互作用时的极限环向角度为 80°，管道达到最小剩余强度时对应的环向角度为 20°。同样可以发现，相同缺陷与不同缺陷进行环向组合时，所得到的极限环向角度是不一样的，这说明单个缺陷的尺寸

会对两个缺陷发生相互作用时的环向角度产生影响。且随着两缺陷深度的增加,缺陷间发生相互作用的极限环向角度也随之增加,但出现最小剩余强度时对应的环向角度逐渐减小。

DNV-RP-F101[5]标准同样给出了腐蚀缺陷间发生相互作用时极限环向角度计算公式,即

$$\varphi = 360\sqrt{\frac{t}{D}} \tag{4}$$

其中:φ 为极限环向角度;D 为管道外径;t 为管道壁厚。

可以发现,标准给出的计算极限环向角度的公式依旧与缺陷的尺寸无关。由式(4)计算出的极限环向角度为84.85°,使用有限元方法计算得到的极限环向间距分别为50°、60°和80°,计算得到的最大相对误差同样高达41%,公式计算结果偏大。

4 剩余强度公式拟合

本研究的L245NCS钢属于低强度钢,适用于评价中低强度钢腐蚀管道剩余强度的标准为ASME B31G标准[3]。该标准给出的腐蚀管道剩余强度计算公式为

$$P_f = (\mathrm{SMYS}+69)\frac{2t}{D}\left(\frac{1-0.85\dfrac{d}{t}}{1-0.85\dfrac{d}{t}M^{-1}}\right) \tag{5}$$

$$M = \sqrt{1+0.6275\left(\frac{l}{\sqrt{Dt}}\right)^2-0.003375\left(\frac{l}{\sqrt{Dt}}\right)^4} \tag{6}$$

其中:P_f为腐蚀管道的剩余强度;SMYS为管道的最小屈服强度;t 为管道的壁厚;D 为管道的外径;M 为膨胀修正系数。

为了验证ASME B31G标准的准确性,从图4和图5的有限元结果中随机选取了45组进行验证,对比结果如图6所示。可以看到,使用ASME B31G公式计算出的失效压力,与有限元结果相比存在较大误差,计算得到的平均相对误差为11.66%,说明ASME B31G公式计算出的结果偏小。

为了使公式计算结果更接近有限元结果,对ASME B31G公式进行了修正。本研究构造的用于计算双点腐蚀管道剩余强度的计算公式如下。

$$P_f = b_1\cdot(\mathrm{SMYS}+69)\frac{2t}{D}\left(\frac{1-b_2\dfrac{d'}{t}}{1-b_3\dfrac{d'}{t}M^{-1}}\right)+b_6 \tag{7}$$

$$M = \sqrt{1+b_4\frac{l'}{\sqrt{Dt}}-b_5\left(\frac{l'}{\sqrt{Dt}}\right)^2} \tag{8}$$

式中,等效长度 l'的计算公式如下。

$$l' = l_1 + l_s + l_2 \tag{9}$$

等效深度 d'的计算公式如下。

1)当腐蚀为轴向双点腐蚀时

$$d' = \frac{d_1 l_1 + d_2 l_2}{l'} \tag{10}$$

2)当腐蚀为环向或复合双点腐蚀时

$$d' = \frac{1}{2}\left(\frac{d_1 l_1 + d_2 l_2}{l'} + \frac{d_1 w_1 + d_2 w_2}{w_1 + l_c + w_2}\right) \tag{11}$$

其中:b_1 为管道屈服强度的修正系数;b_2、b_3 均为缺陷深度的修正系数;b_4、b_5 均为缺陷长度的修正系数;b_6 为管道剩余强度的修正系数;SMYS为管道的最小屈服强度;t 为管道的壁厚;D 为管道的外径;M 为膨胀修正系数;d'为组合后的等效深度;l'为组合后的等效长度;d_1、d_2 分别为两缺陷的深度;l_1、l_2 分别为两缺陷的长度;w_1、w_2 分别为两缺陷的宽度;l_s 为两缺陷的轴向距离;l_c 为两缺陷的环向距离。

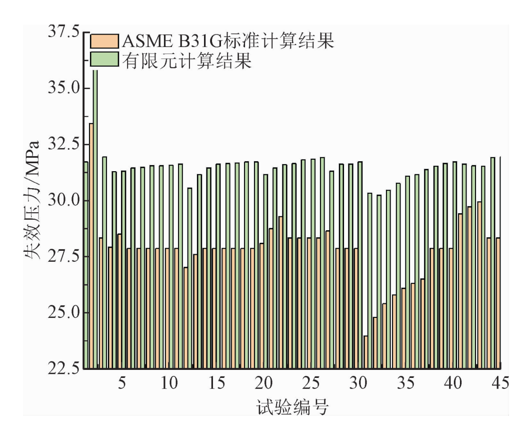


图6 ASME B31G公式计算结果与有限元计算结果的对比

Fig.6 Comparison of ASME B31G formula calculation results and finite element calculation results

根据图4和图5的仿真结果,采用多参数非线性拟合方法确定式(7)、式(8)中的修正系数 b_1 ~ b_6,得到修正后的剩余强度计算公式如下。

$$P_f = 0.00035(\mathrm{SMYS}+69)\frac{2t}{D}\left(\frac{1-3.09\dfrac{d'}{t}}{1-1.87\dfrac{d'}{t}M^{-1}}\right)+31.25 \tag{12}$$

$$M = \sqrt{1-0.1657\frac{l'}{\sqrt{Dt}}+0.0074\left(\frac{l'}{\sqrt{Dt}}\right)^2} \tag{13}$$

从式(10)~式(12)中可以看到,当公式中的其他参数不变时,增加单个腐蚀缺陷的深度 d 会使组

合后缺陷的等效深度 d' 增加,进而导致管道的剩余强度减小,说明单个缺陷的相对腐蚀深度与管道的剩余强度成反比。

用式(12)、式(13)对剩余 15 组有限元结果和从表 1 中随机选取的 8 组实验结果进行验证,对比结果如图 7 所示。对修正公式计算出的结果进行分析后发现,单个缺陷的横截面积越大,修正公式计算出的管道剩余强度越小;而且从图 7 中可以看到,与使用原公式计算的结果相比,使用经过本研究修正后的 ASME B31G 公式计算出的结果更接近实验结果,计算得到的平均相对误差为 1.80%,说明公式的拟合效果很好,可用于计算含不同尺寸双点腐蚀的中低强度管道的剩余强度。

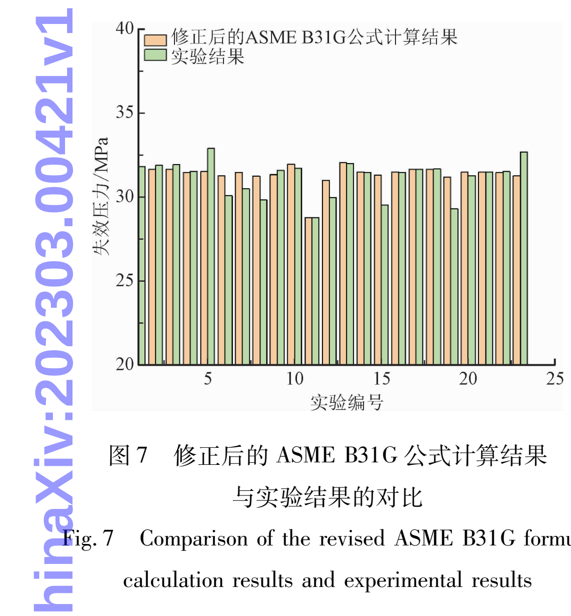


图 7　修正后的 ASME B31G 公式计算结果与实验结果的对比

Fig. 7　Comparison of the revised ASME B31G formula calculation results and experimental results

5　结　论

1)本研究建立了包括单点腐蚀和双点腐蚀的中低强度管道模型,基于塑性失效准则的判别方法,使用 Workbench 对模型进行非线性有限元分析,求解出了腐蚀管道的剩余强度。将有限元结果与实验结果进行了对比,计算得到最小相对误差为 0.51%,最大相对误差为 8.08%,平均相对误差为 3.01%,相对误差的结果较小,验证了模型的可靠性。

2)建立了含轴向和环向不对称双点腐蚀的 L245NCS 钢管道模型。通过对求解出的管道剩余强度进行分析,发现管道内壁上的两个腐蚀缺陷在一定轴向或环向角度内会发生相互作用,使管道的剩余强度降低。使用 DNV-RP-F101 标准中的计算极限轴向间距和极限环向角度的公式计算出的结果与有限元结果相比,最大相对误差均高达 41%,说明对于低强度管道,用此公式计算出的极限距离偏大。原因在于这两个公式中不包含有关缺陷的参数,导致计算结果具有唯一性。

3)对 ASME B31G 公式进行了修正。使用修正后的剩余强度计算公式得到的结果相比于修正前的公式更接近实验结果,平均相对误差由 11.66% 降低到了 1.80%,下降了 9.86%。修正后的 ASME B31G 公式考虑了缺陷间的轴向和环向距离对管道剩余强度的影响,可以用于计算含两个不同尺寸缺陷的中、低强度管道的剩余强度。计算结果作为参考可与管道最大允许操作压力进行比较,以此来决定是否需要更换管道。

参考文献

[1] 贾文龙,廖柯熹,吴瑕,等. 酸性气田输气管道腐蚀缺陷外检测技术[J]. 油气田地面工程,2010,29(7):1-2. (JIA Wenlong, LIAO Kexi, WU Xia, et al. External detection technology for corrosion defects of gas pipelines in acid gas fields[J]. Oil-gasfield surface engineering,2010,29(7):1-2(in Chinese)).

[2] American Petroleum Institute. Specification for line pipe: API 5L[S]. Washington DC: API Publishing Services,2012.

[3] ASME. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines: ASME B31G-2009[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers,2009.

[4] 国家能源局. 钢制管道管体腐蚀损伤评价方法: SY/T 6151-2009[S]. 北京:国家能源局,2009.

[5] DNV. Corroded pipelines: DNV-RP-F101 [S]. Norway: DNV, 2015.

[6] API. Fitness for service: API 579[S]. New York: American Petroleum Institute,2000.

[7] COULSON W. Standard damage-assessment approach is overly conservative[J]. Oil & gas journal,1990,15(15):88.

[8] O'GRADY II T J, HISEY D T, KIEFNER J F. Evaluating corroded pipe-conclusion: pressure calculation for corroded pipe developed [J]. Oil & gas journal,1992,90(42):84-89.

[9] THIBANKUMAR A, SARAVANAN K, MARK O. Residual strength analysis of pipeline with circumferential groove corrosion subjected to internal pressure[J]. Materials today,2020,29(1):243.

[10] AMANDI K U, DIEMUODEKE E O, BRIGGS T A. Model for remaining strength estimation of a corroded pipeline with interacting defects for oil and gas operations[J]. Cogent engineering,2019,33(4):456217.

[11] CHANDRA S K, SARAVANAN K, SANTOSH S P. Buckling strength of corroded pipelines with interacting corrosion defects: Numerical analysis[J]. International journal of structural stability and dynamics,2016,16(9):78-79.

[12] 李非飞,黄坤,吴佳丽,等. X80 管道单腐蚀缺陷失效研究[J]. 应用力学学报,2020,37(1):330-337.(LI Feifei,HUANG Kun, WU Jiali, et al. Research on failure of single corrosion defect in X80 pipeline[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(1):330-337(in Chinese)).

[13] 陈严飞. 海底腐蚀管道破坏机理和极限承载力研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.

[14] 冯欣鑫,余杨,徐立新,等. 双腐蚀缺陷海底管道临界失效压力[J]. 中国海洋平台,2018,33(5):87-94.(FENG Xinxin, YU Yang,XU Lixin,et al. Critical failure pressure of submarine pipeline with double corrosion defects[J]. China offshore platform, 2018,33(5): 87-94(in Chinese)).

[15] 崔铭伟,魏登峰,高嘉喜,等. 双腐蚀缺陷管道剩余强度计算方法[J]. 表面技术,2016,45(8):50-55.(CUI Mingwei, WEI Dengfeng,GAO Jiaxi,et al. Calculation method for residual strength of pipeline with double corrosion defects[J]. Surface technology, 2016,45(8):50-55(in Chinese)).

[16] 华创. 含腐蚀缺陷压力管道剩余强度研究[D]. 北京:中国石油大学,2017.

[17] 陈飞. X80 管道双腐蚀缺陷间相互作用规律研究[J]. 应用力学学报,2020,37(2):723-729.(CHEN Fei. Study on interaction rule between double corrosion defects in X80 pipeline[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(2): 723-729(in Chinese)).

[18] FREIRE J L F,VIEIRA R D,CASTRO J T P,et al. Burst tests of pipeline with extensive longitudinal metal loss[J]. Experimental techniques,2006,30(6):60-65.

[19] SOUZA R D,BENJAMIN A C,VIEIRA R D,et al. Rupture tests of pipeline segments containing long real corrosion defects[J]. Experimental techniques,2007,31(1): 46-51.

[20] BELACHEW C T,MOKHTAR C I,KARUPPANAN S. Strength assessment of a corroded pipeline through the burst test: Case study [J]. Journal of pipeline systems engineering & practice,2016,7(3):04016003.

[21] 吴佳丽. 含腐蚀缺陷 X80 管道失效分析[D]. 成都:西南石油大学,2018.

(编辑　李坤璐)